

氏 名	山 本 桂一郎
生 年 月 日	
本 籍	富山県
学 位 の 種 類	博士 (工学)
学 位 記 番 号	博甲第306号
学位授与の日付	平成11年3月25日
学位授与の要件	課程博士 (学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	極細ステンレス鋼管内壁の高速流動研磨
論文審査委員	(主 査) 黒部 利次 (副 査) 岡島 厚, 上田 隆司, 山田 良穂, 細川 晃

学 位 論 文 要 旨

Abstract

Stainless steel capillary with fine hole and long size has recently been needed for the flow line of pure gas and liquid, which is used in field of precision machinery. Inner wall of such pipe should be finished with high precision. Inner wall polishing of the capillary is very difficult by ordinary finishing methods. In the present study, new polishing method has been developed, in which polishing is performed by flowing slurry at high velocity through the capillary. The developed machine has been proved to have excellent polishing performance. It is found from the experiments that the surface roughness of inner wall of as-received stainless steel capillary is reduced gradually with slurry passes, in which larger of capillary has very enormous reduction rate in early stage of finishing. Usage of larger grain becomes to yield higher reduction of surface roughness. Experiments show that higher concentration of grain into a liquid has a great effect on small inner diameter of capillary, but less effect on larger ones. The medium of the grass beads annexed into the slurry has fine finishing characteristics rather than slurry medium. Surface roughness decreases with slurry flow pass number and its decreasing modes very due to the property of medium. It is found that the pressure measurement of N_2 gas flow can be applicable for an estimation of the finishing level of capillary.

1. 緒 言

金属製の管は、その内径の大きさに応じて使用される用途が一般に違ってくる。内径が数mmから数十cmに及ぶ管は、その内壁を何らかの方法で研磨加工している場合が多い。管の内面を研磨する方法としては、ホーニングや電解研磨法、磁気研磨法、化学研磨法等があり、目的に応じて使い分けされている。また、電解研磨に砥粒の擦過作用を複合させた電解複合研磨法も効果があるといわれている。しかしながら、ガスや液体の精密輸送管として使用されているステンレ

ス鋼極細管（内径が1mm以下の長尺管）の場合，その内壁を在来の研磨法で精度よく磨くことは必ずしも容易ではない．最近，加工精度に対する要求が厳しくなるにつれて，新しい研磨法を模索する必要に迫られている．そこで，本研究では溶媒に砥粒を混合した液体を，空気圧を介して長尺の細管内に強制流入させ，管の左右端についてそれを交互に繰り返し往復動させることによって研磨する方法について検討した．

2. 研磨装置および研磨面の評価方法

2.1 研磨装置

研磨装置を設計するに当たって，特に次の諸点に留意した．(1)スラリーを往復動させる．(2)溶媒と砥粒の懸濁が十分行える．(3)管径や管長が変わっても対応できる．これらの諸条件を考慮して開発した研磨装置の概略図を図2.1に示す．装置は，エアーコンプレッサ，直圧式増圧器，カートリッジ，等々から構成されている．

図2.1に示すカートリッジAにはイオン交換水と砥粒が入れている．カートリッジBにはイオン交換水のみが予め入れられている．カートリッジAに挿入されている2本の管の内の1本は，管の底近くまで挿入されている．もう1本の挿入管はカートリッジBに連結されている．カートリッジBに挿入されている管の内の1本は直圧式増圧器に接続されている．被研磨管のステンレス鋼極細管は，カートリッジに挿入されている管の一端に固定ブロックを介して接続されている．

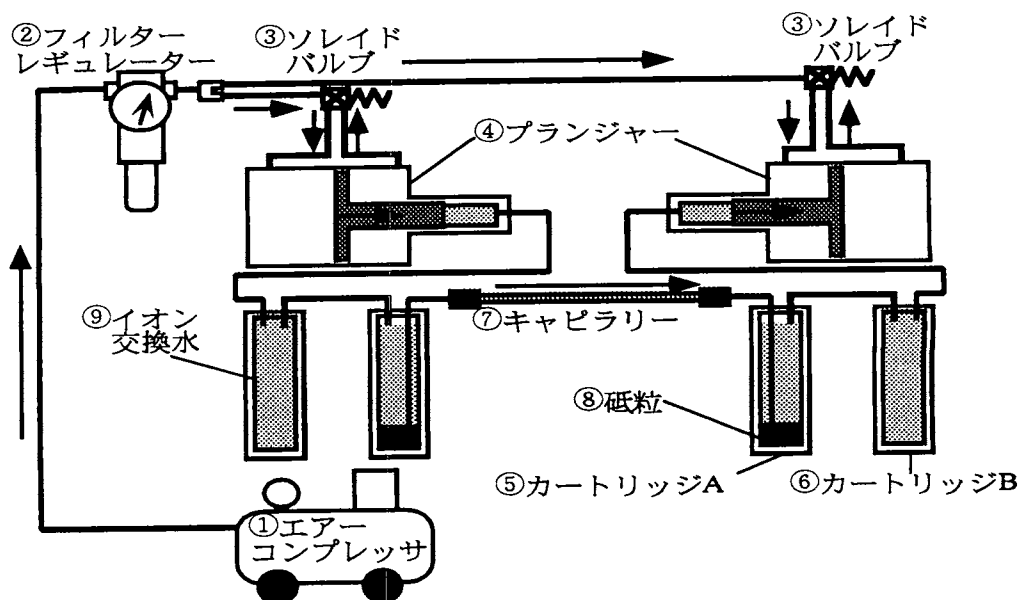


図 2.1 研磨装置の概略図

2.2 実験方法

実験に際し，エアーコンプレッサーを駆動し，圧縮された空気をフィルターレギュレーターを介して直圧式増圧器に注送する．注送された空気を直圧式増圧器で増圧し，プランジ内に満たされた溶媒に流体圧を負荷する．流体圧を受けた溶媒は，ブロックを通してカートリッジBからカートリッジAへと流れ込む．増圧器側より加圧されて送られた溶媒は，内部に予め沈澱させておいた砥粒といっしょに中央のステンレス管を通して吸い上げられ，細管内に流れ込む．細管内を流動するスラリーは高速流となり，砥粒は壁面に衝突したり引っ掻き作用を行いながら流れていく．

スラリーが細管内を流れきると、次に、電磁弁を切り替えて圧縮空気を反対側の増圧器に送る。その結果、スラリーは逆向きの方向に流れる。本操作を繰り返すことによって管内壁の研磨が行われる。

2.3 研磨面の評価方法

研磨した管の評価は次のようにして行った。まず、研磨管の内側をジェット水流で洗浄する。洗浄後、図 2.2 に示すように管の中央から左右 10mm 離れた場所を薄刃の鋭利なカッターで切断する。切断した 20mm 長の被観察用試料は、次の手順で測定に都合のよい形に加工した。始めに、切断分離した 20mm 長の中空管の両端を粘土で封止する。その後、それを高さ 30mm、直径 30mm のプラスチック製の容器に入れ、その中に包埋用樹脂を流し込み硬化させる。硬化後、包埋材を容器から取り外し、それをサンドペーパー（＃ 400）で慎重に少しずつ削る。そして、管の断面中心部よりもやや下になるように削り込む。その様子を図 2.3 に示す。その後、十分洗浄して管内を観察した。観察は、光学顕微鏡（ノマルスキー干渉顕微鏡）、走査型電子顕微鏡（SEM）を用いて行った。また、粗さの測定は触針式粗さ計を使用して行った。管内壁の研磨状態を評価するもう一つ別の方法として、管内に気体を流しその差圧を測定する方法がある。これは、管内面の研磨状態によって、管内を流れるのガスの流れ具合が変わり、その変化が差圧として測定される。図 2.4 に、差圧測定装置の概略図を示す。研磨後の細管の一部（長さ 50mm）を、質量流量制御装置と差圧計の間に設置し、測定用の窒素ガスを流す。

質量流量制御装置で流量が一定（4cm³/min）となるように制御し、制御されたガスは試料（細管）を通して大気中に流出する。流出圧力はダイヤフラム式の差圧計で計測される。測定は、室温 25℃のクリーンルーム内で行った。差圧の測定条件を表 2.1 に示す。

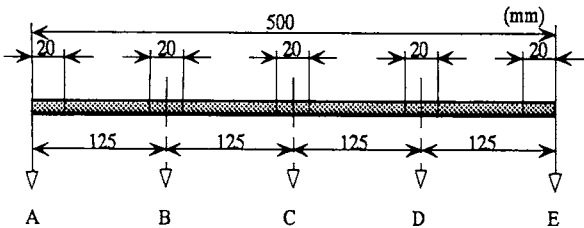


図 2.2 細管の切断位置

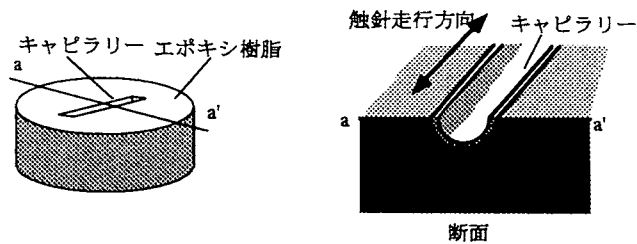


図 2.3 試料観察の前処理

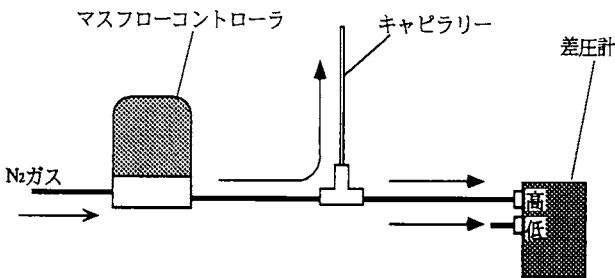


図 2.4 差圧の測定装置の概略図

表 2.1 差圧の測定条件

ガス	N ₂
流速	4cm ³ /min
キャピラリーの長さ	50 mm

3. 実験結果

3.1 内径 0.28mm 管の精密研磨

実験には、長さ 500mm で内径 0.28mm の極細ステンレス鋼管を供した。研磨には、アルミナ砥粒を使用し、砥粒の平均粒径を 0.6 ～ 30 μ m の範囲で種々変えて行った。図 3.1 に、砥粒径の影響について調べた結果を示す。実験は、砥粒濃度 3.44vol%，パス回数 30 回、注入圧力 10.8MPa と

して行った。図3.1から、砥粒の平均粒径が大きくなるにつれて、内壁面の表面粗さが次第に小さくなっていく様子がわかる。しかし、平均粒径が約 $20\mu\text{m}$ 以上の大きな砥粒になると、研磨面の粗さはほぼ一定の値となって飽和する。

図3.2に、管軸に沿って表面粗さがどのように変化するか調べた結果を示す。粗さの測定位置は図2.2に示した場所と同じである。実験は、砥粒の大きさを変えて($0.6, 5.5, 20\mu\text{m}$)行った。図3.2から、いずれの砥粒の場合も、管軸方向のどの位置においても一様に研磨されていることがわかる。粗さの絶対値は、径が大きい砥粒の方が小さい。次に、表面粗さの低減にスラリーの流動パス回数が如何なる効果を有するか調べた。測定結果を図3.3に示す。図3.3から、パス回数が増すにつれて表面粗さは急激に低減していく様子がわかる。しかし、粒径が $5.5, 20\mu\text{m}$ の砥粒の場合、パス回数が20回以降ほぼ面粗さは一定の値になるようである。すなわち、飽和する。しかしながら、 $0.6\mu\text{m}$ の砥粒については漸減傾向は続く。

研磨による面粗さの低減が、ガスの管内流れにどのような影響を及ぼすか調べた。図3.4に測定結果を示す。図3.4から、研磨によって面粗さが小さくなるにつれて差圧の値も次第に小さくなっていく。その様子は、図中に示す②の直線で示される。しかし、面粗さがさらに減少すると

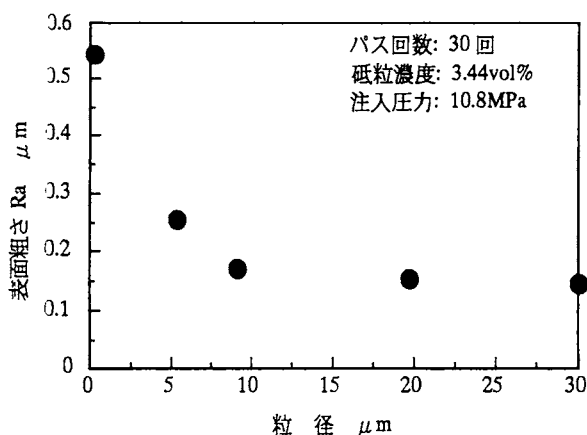


図3.1 砥粒径が表面粗さに及ぼす影響

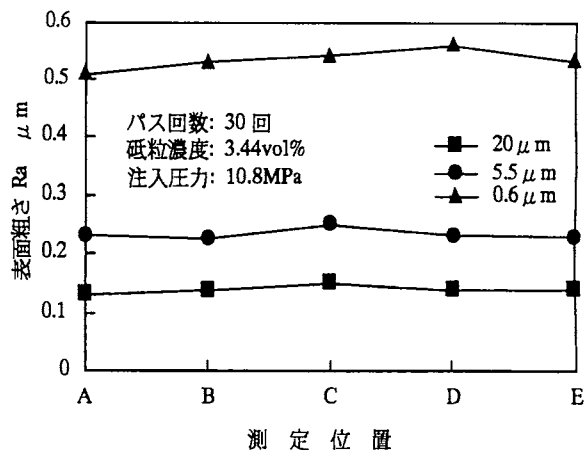


図3.2 測定位置と表面粗さの関係

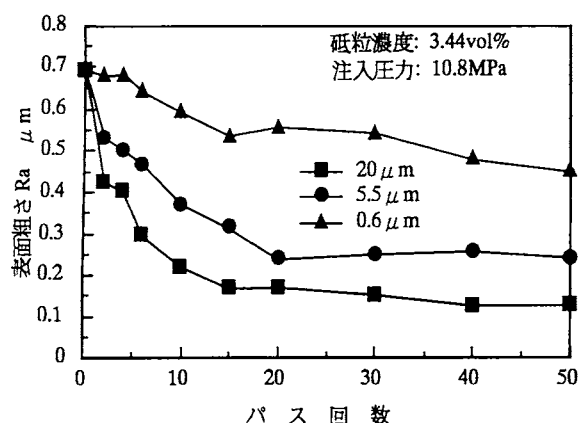


図3.3 パス回数と表面粗さの関係

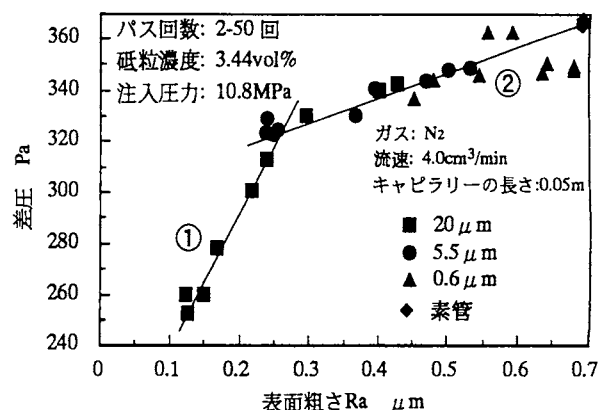


図3.4 差圧と表面粗さの関係

差圧は急激に小さくなる(①の直線)。表面粗さの値が約 $0.25\mu\text{m}$ の所で直線の傾きが急激に変化する。その理由は明確ではないが興味ある現象である。本測定結果は、検量線図としても利用できると考えられる。すなわち、研磨後の管の差圧を測定すれば、管内壁面の粗さが推定できる。

3.2 内径の異なる各種細管の研磨特性

内径が異なる3種類($\phi 0.28, 0.4, 0.6\text{mm}$)の極細ステンレス鋼管(長さ 500mm)について、その研磨特性を調べた。研磨はアルミナ砥粒を使用して行った。注入圧力は 10.8MPa である。図3.5に管径と表面粗さの関係を示す。

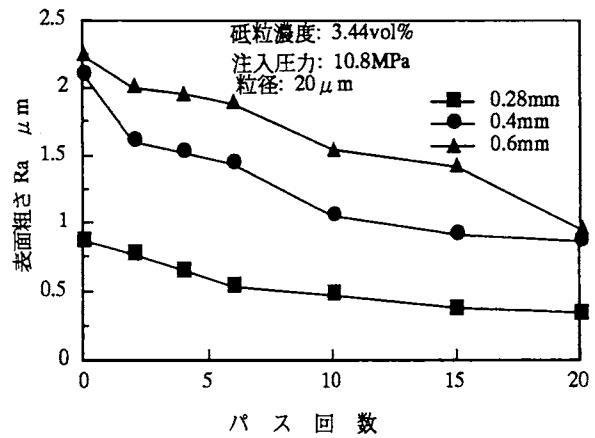


図3.5 管径と表面粗さの関係

図3.5から、いずれの内径の細管の場合でも、表面粗さはパス回数が増えるにつれて次第に低減していくことがわかる。低減の度合いはパス回数が10~15回あたりまで大きく、それ以降は漸減もしくは飽和する傾向にある。SEM観察の結果から、素管内壁のテクスチャ(微細な凹凸模様)パターンはパス回数が増えるにつれて漸次消滅していくことがわかった。本観察結果は、図3.5の測定結果とよく照応している。

3.3 表面粗さ低減に及ぼす 2段階研磨の効果

これまでの一連の実験から、表面粗さは、あるパス回数の所で飽和してしまう現象がみられた。そして飽和する所での表面粗さは、使用する砥粒の大きさによって決まってしまうという憂慮すべき現象が観察された。このことは、パス回数を飽和点を越えて断続しても表面粗さは何ら改善しないことを意味する。そこで、遊離砥粒を使用するラッピング加工(砥粒を粗粒から細粒に変えて面粗さの改善を図る)に着想を得て、飽和した時点で砥粒を粗粒から細粒に変えれば効果があるのではないかと期待した。原理の確認を目的に、ただ一回砥粒の粒径を変えて実験(2段階研磨と呼ぶ)を行った。

図3.6に内径 0.28mm の管の測定結果を示す。横軸のパス回数は、第1段階(平均粒径 $20\mu\text{m}$ の砥粒による研磨)からの累積した総パス回数を表す。図3.6から、表面粗さが飽和するパス回数(第1段階研磨)のところで、砥粒を粗粒から細粒に変えて研磨(第二段階研磨)したところ、さらに表面粗さが低減する様子がわかる。二段階研磨は、表面粗さの一層の低減に著効があるといえる。

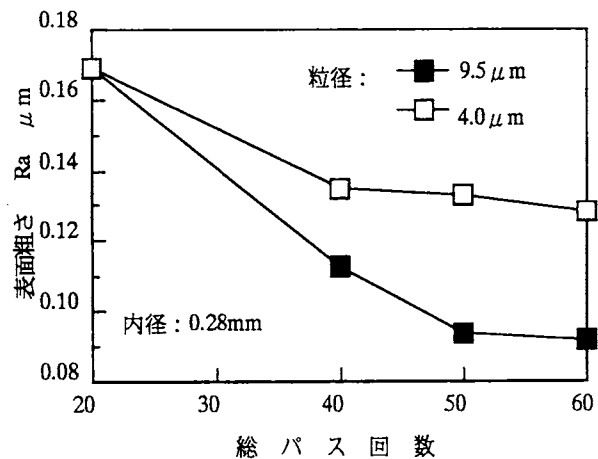


図3.6 内径 0.28mm 管の2段階研磨の効果

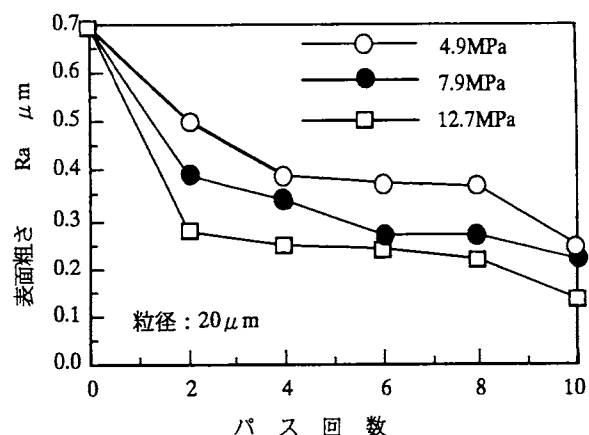


図3.7 パス回数が表面粗さに及ぼす影響(内径 0.28mm 管)

3.4 注送圧力の影響

高速流動研磨法の場合、砥粒を保持しているのは流体であるので、研磨圧力を砥粒に付与するのも流体を介して行う他ない。加工圧力を高めるにはスラリーの流動速度を大きくすることが効果的と思われる。これまでの実験は、スラリーを被研磨管に注送する圧力を一定としたものであり、その圧力を制御すると、どのような効果が現れるのか検討する必要がある。そこで、細管に注入するスラリーの圧力を変えて実験を行った。実験は、研磨の進捗状態を調べるため、パス回数を、0、2、4、6、8、10回と種々変えて行った。

図3.7に、内径0.28mmの管のパス回数と表面粗さの関係を示す。図3.7から、パス回数が増えるにつれて、いずれの注送圧力の場合も、表面粗さはパス回数の増加とともに類似した形で次第に減少する様子がわかる。表面粗さは、パス回数を2回目程度経ただけで激減する。図3.7から、注送圧力が大きいほど表面粗さの低減度合いが大きいことがわかる。これは、管内を流れるスラリーの流速が注送圧力が大きいほど大きく、壁面に砥粒が衝突し研磨を営む能力が大きくなるためではないかと考えられる。

3.5 ガラスビーズ添加の影響

ラッピングやポリッシングは、砥粒を溶媒中に懸濁させて、その混合溶液をワークと研磨盤の間に流して湿式法で研磨する方法である。砥粒は、液中でラップ工具やポリシャに支持された状態でワークに対して研磨作用を行う。一方、スラリー高速流動研磨の場合、砥粒を支持するのは流体のみである。このため、研磨を制御する制御因子は極めて限られたものになる。そこで、砥粒径よりも大きな球状のガラスビーズをスラリーに添加すると、研磨作用が促進されるのではないかと考えた。ビーズ添加スラリーによる高速流動研磨法について実験的検討を行った。

図3.8に、内径0.4mmの管についてガラスビーズを添加して研磨した場合の実験結果を示す。実験は、1)イオン交換水にガラスビーズを添加した溶液で研磨、2)イオン交換水に砥粒を懸濁したスラリーで研磨、3)スラリーにガラスビーズを添加したビーズ入りスラリーで研磨、の条件で行った。研磨は、砥粒濃度を3.44vol%、パス回数を20回、ガラスビーズの添加量を1.5vol%で行った。図3.8から、管内壁面の粗さの低減度合いは、ガラスビーズ入り水、スラリーのみ、ガラスビーズ入りスラリーの順に大きくなることが認められる。このことは、ビーズを添加した溶媒の場合には、研磨の能力は極めて少ないことを物語っている。一方、スラリーにガラスビーズを懸濁させた場合、ビーズと砥粒の衝突効果(内壁面に作用する砥粒の運動エネルギーを増大させる)が大きく、粗さの低減につながったものと思われる。図3.9にパス回数の影響を示す。図3.9から、パス回数が増えるにつれて表面粗さは漸減していくことがわかる。スラリーへのガラスビーズの添加は、粗さの低減に効果がある。

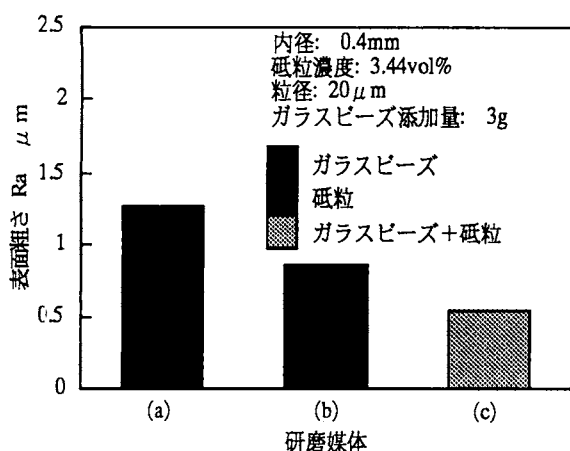


図3.8 ガラスビーズ添加の効果

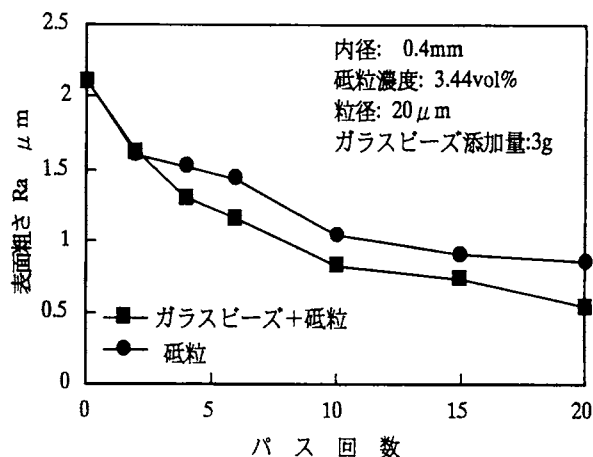


図3.9 パス回数が表面粗さに及ぼす影響

4. 結 言

ステンレス極細管は、引き抜き加工によって製造されるため、管内壁は必ずしも平滑ではない。引き抜き方向に独特のテクスチャ（織り目模様の表面の微細凹凸パターン）を有する荒れた面となっている。通常、テクスチャの微細凹凸部は不純物が付着し易く、また、ガスの停留場所ともなる。そのような管を製品に搭載すると、ときとして不純物が管壁から剥離して予期せぬ事故を起こしたりする。その他、素管をそのまま使用すると、ガスとの接触面積も必然大きくなり、残留水分や析出物がガスと反応する恐れもある。本研究では、高速流動研磨方法を新規に開発し、素管（極細ステンレス鋼管）内壁面の平滑化を効率よく、かつ、高精度に行うことを試みた。実験の結果、有用な知見が多く得られた。実用化への道が拓かれたと確信するに至った。

学位論文審査結果の要旨

平成11年1月26日および平成11年2月1日の口頭発表後の第1，2回審査委員会において、面接審査等を通して慎重に審査し、以下のように判定した。

ガスや液体の精密輸送管として使用されているステンレス鋼極細管は、その内径が1 mm以下で、素管長が数十cm～数mに及ぶ長尺管である。そのため、管内壁の研磨は従来法では極めて困難である。本研究では、溶媒に砥粒を混合した液体（スラリー）を、空気圧を介して長尺の細管内に強制流入させ、管の左右端についてそれを交互に繰り返し往復動させることによって研磨する方法（高速流動研磨法）を提案し、以下の結果を得ている。1）各種内径の細管について高速流動研磨実験を行い、その基本特性について検討している。素管内壁面に見られるテクスチャ（微細凹凸模様）は、流動パス回数の増加とともに次第に消滅していくことを明らかにしている。2）表面粗さの低減に飽和現象がみられるが、その飽和点で砥粒を粗粒から細粒に変えると、管内壁面の粗さがさらに低減することを示している。二段階研磨法と命名している。3）スラリーの中にその砥粒径よりも大きなガラスビーズを混入（ガラスビーズ入りスラリーと呼ぶ）すると研磨作用が促進されることを示している。

以上のように、新しく高速流動研磨法を提唱し、ステンレス鋼極細管内壁の研磨に有効なことを実証すると同時に、本法が、各種輸送管の研磨に実用可能なことを示しており、博士論文に値するものと判定した。